

エージェントベースモデリングによる感染症対策プログラムにおける学校閉鎖期間の検討

石西正幸 (防衛省)

市川学 田沼秀樹 出口弘 (東京工業大学)

金谷泰宏 (国立保健医療科学院)

A Study on Term of School Closure for Countermeasure against Infectious Disease Using Agent-based Modeling

*M. Ishinishi (Ministry of Defense)

M. Ichikawa, H. Tanuma, H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

Y. Kanatani (National Institute of Public Health)

Abstract– This study aims to evaluate social protection policies in case of outbreak of infectious disease with high fatality rate using mathematical model. The social protection policies mean sets of the end time and the start of school closure. We consider smallpox to the infectious disease with high fatality rate. We also evaluate the social protection policies using an agent-based smallpox epidemic social model using Spot Oriented Agent Role Simulator (SOARS). In this paper, disease state transition of smallpox, infection process, social structure, human activity, social countermeasure, simulation condition that include parameters, and simulation results are described.

Key Words: エージェントベースモデリング, 社会シミュレーション, SOARS, 天然痘, 学校閉鎖

1 まえがき

感染症の大規模流行は、社会生活を営む上で大きな障害であり、致死性の高い感染症の発生は、人類における大きな脅威である。2007年では麻疹が、2009年にはインフルエンザ(A/H1N1)が流行し、幅広い年齢層で患者が発生した。これらの感染症では、ワクチン未接種またはワクチンそのものが存在しないことから、対応するワクチンの開発、生産、流通に時間がかかることにより、幅広い地域で流行した。

感染症の感染拡大防止にあたっては、手洗い・うがい、マスクの着用、十分な睡眠、バランスのとれた栄養摂取等の個人的対策の他に、ワクチン接種や学校閉鎖・自宅待機による患者との隔離等の社会的対策がある。

近年、感染症の分析において、微分方程式を用いた疫学モデル¹⁾に代わる、エージェントベースモデルによるシミュレーションを用いた分析が盛んに行われている²⁾³⁾⁴⁾。エージェントベースモデルによる感染症の分析では、社会を構成する一人ひとりの行動や生活様式を表現して計算機上で模倣することにより、感染症のマクロ的な被害規模の推定のみならず、感染経路の推定や社会的対策の効果について理解することができる。

社会的対策のうち学校閉鎖は、ワクチン接種とともに従来から感染症の流行の度に実施されてきた。しかしながら、開始のタイミングと継続日数について、シミュレーションを含めた数理モデルで分析することは、従来では困難であり、過去の統計データから経験的に推定せざるを得ない。そのため、過去のデータのない病態遷移の異なる感染症や社会環境の変化への対応が困難だった。

本研究では、致死率の高い感染症の一つである天然痘を例に、その病態遷移、感染過程、都市及び人口構造、住民行動、社会対策をモデル化する。そして、シミュレーションにより、患者発生メカニズムと被害規模を推計するとともに、予防接種対策、学校閉鎖、及

び交通遮断等による社会防衛対策を検討している⁵⁾。

本稿では、学校閉鎖の開始及び終了時期の設定が感染拡大にいかなる効果を与えるかについて評価を行う。

2 方法

本研究では、エージェントベースモデルにより住民の行動、人口、及び都市構造をマイクロレベルでモデル化するとともに、シミュレーションの構築において、感染症におけるウイルス拡散現象を社会シミュレーション言語 SOARS(Spot Oriented Agent Role Simulator)により記述している⁶⁾。

モデル化にあたっては、SOARSの仕様から、住民をエージェント、相互作用の場である都市構造をスポット、職業や患者などの社会的・病態的役割をロール、住民の行動をルールの集合体とした。また、シミュレーションでは、離散時間におけるエージェントの行動および状態遷移を複数の段階¹⁾に分割して処理されている。

SOARSには、以下の3つの特長があり、予防接種や学校閉鎖などの社会防衛対策を実装しやすい利点がある。

1. スポットを用いることで物理的位置関係に制約されずにエージェント間の相互作用を実現できる。
2. ロールを用いることでエージェントの状態と社会的役割に対応した行動を容易に表現できる。
3. ステージ、フェーズ、ターンを用いることで、エージェントの状態遷移、行動、及びエージェント間の相互作用を区別し、エージェントルールの実行順序により状態遷移に差が生じないような干渉分解された役割遂行を表現できる。

¹⁾シミュレーション上の時間単位を表すステップ、エージェントのまとまった動作を実行する制御単位を表すステージ、各エージェントの役割ルールを実行するための単位を表すフェーズ、個々のエージェントのルールの実行単位を表すターンに分割される。

3 モデル化

本研究では、社会シミュレーションを表現するため、4つのモデルから構成されている。

病態遷移モデル 個々のエージェントの天然痘に罹患した場合の病態変化を表す。

感染プロセスモデル 罹患したエージェントから未感染のエージェントへの感染を表した

都市構造と人口構成モデル 家庭・職場・学校・交通機関等の都市構造および居住する世代別人口と世帯数を表す。

住民行動モデル 家庭、学校、職場等を移動し接触を行う住民の社会的活動を表す。

3.1 病態遷移モデル

筆者らは、病態遷移の表現にあたって、Wuらによる病態遷移モデルを採用した⁷⁾。Fig.1に示されるように、エージェント*i*の病態 (Agent Disease Stage: $ADS(i)$) は8種類に区分され、病態ごとに遷移確率に応じて定められた期間で遷移する。

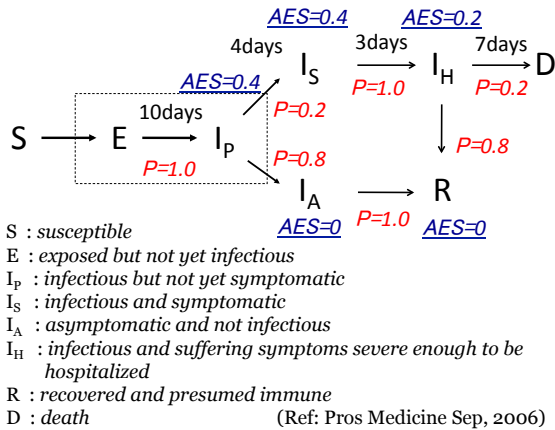


Fig. 1: Agent's Disease State Transition

3.2 感染プロセスモデル

本研究では、患者が未感染の人に直接触れて感染するプロセスは採用せず、人から場（スポット）の汚染、汚染された場から人への感染を感染プロセスとして分割するモデルを考慮した⁸⁾⁹⁾。

エージェント*i*の感染プロセスは、Fig.2に示されるとおり、病原体の排出、スポットの汚染、エージェントの汚染、エージェントの感染に分割される。

時刻*t*における病原体（ウイルス）の排出 (Agent Excretion Scale: $AES(i, t)$) は、病態遷移モデルにおけるエージェント*i*の病態に応じて Fig.1 で示される。

場（スポット）の汚染 (Spot Contamination Level: $SCL(k, t)$) は、1ステップ前の場の汚染に対する減衰の結果と、その場にいるエージェントから排出された病原体による汚染が加わって決定される。

エージェントの汚染 (Agent Contamination Level: $ACL(i, t)$) は、1ステップ前のエージェン

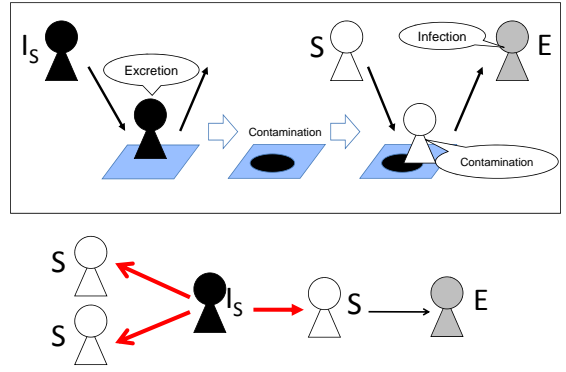


Fig. 2: The Infection Process

トの汚染に対する減衰の結果と、その場におけるエージェントの危険度が加わって決定される。

エージェントの感染は、エージェントの汚染の程度とエージェントの持つ免疫から決定される。

以下で、感染プロセスにおける定式化を行う。

3.2.1 定式化

時刻*t*におけるエージェント*i*の危険度 (Agent Hazard Level: $AHL(i, t)$) は、次式のとおりに個人防護具等 (Personal Protective Equipment) による病原体の排出抑制フィルター (Excretion Protection Filter: $0 \leq EPF(i) \leq 1$) と $AES(i, t)$ との積で表わされる。 $EPF(i)$ は、0に近ければ排出が抑制され、1に近ければそのまま排出される。

$$AHL(i, t) = AES(i, t) \cdot EPF(i) \quad (1)$$

スポット*k*における危険度は、

$$AHL(k, t) = \sum_{i \in Spot(k)} AHL(i, t) \quad (2)$$

となる。

まず、スポットの汚染について考慮する。時刻*t*におけるスポット*k*の汚染度 (Spot Contamination Level: $SCL(k, t)$) は、時刻*t-1*における $SCL(k, t-1)$ とスポット*k*の汚染の減衰を表すフィルター (Spot Attention Filter: $SAF(k, t-1)$) の積、及び時刻*t*におけるスポット*k*の危険度 $AHL(k, t)$ との和として表される。

$$SCL(k, t) = AHL(k, t) + SCL(k, t-1) \cdot SAF(k, t-1) \quad (3)$$

時刻*t-1*におけるスポット*k*の汚染の減衰を表すフィルター $SAF(k, t-1)$ は、湿度や気温等の環境要因による病原体の減衰と消毒による病原体の減衰で決定される。環境要因によるフィルター (Environment Spot Attenuation Filter) は、 $EnSAF(k, t-1)$ として表され、0~1の値を取る。同様に、消毒によるフィルター (Sterilization Spot Attenuation Filter) は、 $StSAF(k, t-1)$ で表され、0~1の値を取る。0に近ければ排出が抑制され、1に近ければそのまま排出される。 $SAF(k, t-1)$ は、上記の積で表される。

$$SAF(k, t-1) = EnSAF(k, t-1) \cdot StSAF(k, t-1) \quad (4)$$

スポットの汚染からエージェントの汚染が決定されるプロセスでは、スポットの密度とエージェント側の予防対策から決定される。

スポットの密度では、スポットの性質とエージェントの行動形態等によって接触頻度が異なり、それを厳密に表現することが困難であるため、スポットにおける接触密度を表現するパラメータであるバーチャル密度 (Virtual Density: $VD(k)$) を導入する。 $VD(k)$ は、自宅、学校、職場、交通機関等によって異なる値を取り、バーチャル空間サイズ (Virtual Space Size: $VSS(k)$) の逆数として与えられる。

$$VD(k) = \frac{1}{VSS(k)} \quad (5)$$

時刻 t におけるスポット k の密度リスク (Density Risk by SCL: $DRSCL(k, t)$) は、スポットの汚染度 $SCL(k, t)$ と $VD(k)$ の積で与えられる。

$$DRSCL(k, t) = SCL(k, t) \cdot VD(k) \quad (6)$$

エージェント側の予防対策は、マスク等の使用によるエージェント汚染防護フィルター (Agent Contamination Protection Filter: $ACPF(i, t)$) で表され、 $0 \sim 1$ の値を取る。 0 に近ければ排出が抑制され、 1 に近ければそのまま排出される。

エージェント側の予防対策を行った後のエージェント i のスポット k における危険度 (Spot Hazard Level After Protection: $SHLAP(k, i, t)$) は、エージェント汚染防護フィルター $ACPF(i, t)$ とスポット k の密度リスク $DRSCL(k, t)$ との積で表される。

$$SHLAP(k, i, t) = DRSCL(k, t) \cdot ACPF(i, t) \quad (7)$$

次にエージェントの汚染について考慮する。スポットの汚染の場合と同様に、エージェントの減衰フィルター (Agent Attenuation Filter: $AAF(i, t)$) は、湿度や気温等の環境要因による病原体の減衰フィルター (Environment Agent Attenuation Filter: $EnAAF(t)$) と消毒・手洗いなどの感染予防対策による減衰フィルター (Sterilization Agent Attenuation Filter: $StAAF(i, t)$) の積で求められる。各フィルターは、 $0 \sim 1$ の値を取る。

$$AAF(i, t) = EnAAF(t) \cdot StAAF(i, t) \quad (8)$$

エージェントの汚染 (Agent Contamination Level: $ACL(i, t)$) は、エージェント i のスポット k における危険度 $SHLAP(k, i, t)$ と以前の $ACL(i, t)$ とエージェントの減衰フィルター $AAF(i, t)$ から与えられる。

$$ACL(i, t) = SHLAP(k, i, t) + ACL(i, t-1) \cdot AAF(i, t-1) \quad (9)$$

エージェントの感染は、エージェントの汚染の程度とエージェントに対するワクチン接種等による免疫等の個体免疫レベルによって確率的に決定される。各ステップごとにエージェントが感染する確率 $P(i, t)$ は、エージェントの抗体価 (Physical Condition: $PC(i)$) と $ACL(i, t)$ から求められる。

$$P(i, t) = 1 - e^{-PC(i) \cdot ACL(i, t)} \quad (10)$$

3.3 都市構造と人口構成モデル

本研究における都市構造は、地理情報等の現実における精緻なモデル化が問題の本質的議論から外れることから、感染に関係した要素のみに集約した最小限のスポットを取り扱うこととする。

本稿における都市構造と人口構成のモデル化にあたって、世代構成、世帯人口構成、都市構造は、2005年国勢調査に基づく人口1万人の都市を想定している。

世代構成は、Table3にあるように6つのカテゴリに分類し、年齢ごとの人口からカテゴリごとの人数を都市人口に適合させるように算出した。各世代の抗体価 ($PC(i)$) は、壮年・高年が過去にワクチンを接種していることから、乳幼児、児童、生徒、青年と比較して高いものとする。

世帯人口構成は、Table1のとおり世帯種別ごとに8つのカテゴリに分類し、日本の人口と各世帯数から都市人口に適合するように算出した。

都市構造は、Table2にあるように学校 (小学校、中学・高校)、職場 (大企業、中小企業、零細企業)、交通機関、病院に分類している。なお職場数については、全国の事業所数及び従業員数から比率を算出し、1万人の都市に適合させている。

Table 1: Household Sizes

世帯	世帯数	人口
1人	1183	1183
2人	1042	2084
3人	736	2208
4人	617	2468
5人	228	1140
6人	97	582
7人	37	259
8人以上	10	80

Table 2: Urban Structure

区分	数	
学校	小学校	1
	中学・高校	1
職場	職場 (大)	1
	職場 (中)	5
	職場 (小)	549
交通機関	4	
病院	1	

Table 3: The Age Distribution on the Virtual City

記号	世代名	年齢	人数	免疫	抗体価
Baby	乳幼児	0~5	531	0	1
Child	児童	6~12	655	0	1
Student	生徒	13~18	597	0	1
Young	青年	19~34	2104	0	1
Middle	壮年	35~59	3425	0.7	0.3
Old	高年	60~	2688	0.7	0.3

3.4 住民行動モデル

住民行動モデルは、都市構造と人口構成モデルで決定された属性を持つエージェントが、家庭、学校、職場等を移動し接触を行う住民の社会的活動をモデル化したものである。感染したエージェントは、感染プロ

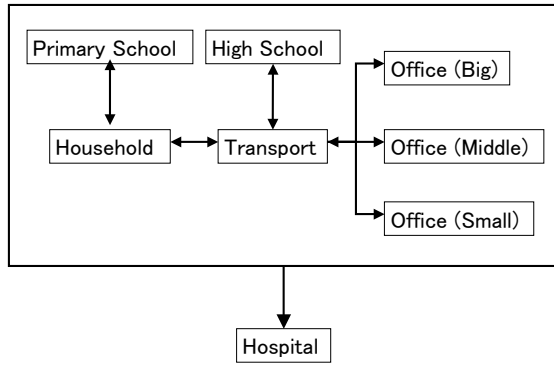


Fig. 3: The Human Activity Model

Table 4: Human Activity

世代	時刻	行動
Child	8:00am	登校
	4:00pm	帰宅
Student	8:00am	交通機関で通学
	9:00am	登校
	3:00pm	交通機関で下校
	4:00pm	帰宅
Young,Middle	8:00am	交通機関で通勤
	9:00am	出勤
	6:00pm	交通機関で帰宅
	7:00pm	帰宅

セスモデルで定式化したとおり、病原体を排出してスポットを汚染させる。そして未感染のエージェントが、汚染されたスポットに入ることにより感染するというプロセスをたどる。

エージェントの1日の行動は、Table4に示すとおり、乳幼児と高年を除く世代が家庭と学校または職場を往復する。またFig.3に示すとおり、児童は、家庭と学校を直接往復し、生徒は、家庭と学校を往復する際、交通機関を利用する。青年及び壮年も、家庭と職場を往復する際、交通機関を利用する。

エージェントの行動を制約する政策として、(1) 学校閉鎖、(2) 職場閉鎖、(3) 交通封鎖があるが、本稿では(1)のみを考える。

4 シミュレーション

ここでは、学校閉鎖の開始日と実施期間の組合せにより、初期に感染した患者からどのように感染が拡大するか、効果的な学校閉鎖の実施期間はどの程度なのかをシミュレーションにより分析する。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件として、初期状態において50人(児童、生徒、青年、壮年及び高年から10人)が天然痘に感染し、10日経過した時点²からシミュレーションをスタートさせる。時刻経過は、30分経過することに1ステップ進める離散時間とする。3章で示した定式化におけるパラメータとして、Table5で示す値を用

²すなわち、Fig.1における I_p の状態である。

Table 5: Parameters

パラメータ	名称	Value
EPF	排出防止フィルタ	0.3
$EnSAF$	環境減衰フィルタ(スポット)	0.8
$StSAF$	消毒によるフィルタ(スポット)	1
VSS	バーチャル空間サイズ	10000
$ACPF$	汚染防御フィルタ	1
$EnAAF$	環境減衰フィルタ(人)	0.8
$StAAF$	消毒によるフィルタ(人)	1

いるものとする。なお、スポットにおけるパラメータは全てのスポットが、人におけるパラメータは全てのエージェントが同じ値を持つものとし、時間経過による変化はないものとする。

シミュレーションの実施にあたっては、学校閉鎖の開始日(シミュレーション開始日からの遅れ)を、シミュレーション開始当日(遅れなし)、シミュレーション開始後10日目、12日目、13日目、14日目、20日目の6種類に、学校閉鎖の実施期間を5日間、10日間、15日間、20日間、25日間、30日間の6種類に分類した。

4.2 シミュレーション結果

Fig.4は、新規感染者数における学校閉鎖の開始日及び期間との関係を表す。シミュレーションの組合せは、縦に学校閉鎖の開始日、横に学校閉鎖の実施期間を示している。例えば、“No delay, For 5 days”では、シミュレーション開始当日に学校閉鎖を開始して5日間継続することを意味し、“20days delay, For 30days”では、シミュレーション開始後20日目に学校閉鎖を開始して30日間継続すること(すなわち学校閉鎖終了が50日目)を意味する。各グラフの縦軸は新規感染者数、横軸は経過日数を示し、赤色は児童、緑色は生徒を表す。シミュレーションは5回実施し、その平均値を示している。

まず、学校閉鎖の実施期間が同じ場合で、異なる学校閉鎖の開始日のケースを比較する。学校閉鎖の実施期間が10日間である“For 10days”の場合、学校閉鎖開始日10日目と12日目で比較すると、第1次感染以降抑えられていた開始日10日目のケースに対して、開始日12日目では31日目から感染拡大が発生している。これは、第1次感染の起こっている10日目~12日目の間に汚染されたスポットで未感染のエージェントが病原体と接触し、感染が起こっているためであると考えられる。開始日が13日目、14日目、20日目の場合も同様に、第1次感染の起こる際に未感染のエージェントが病原体と接触していると考えられる。

次に、学校閉鎖の開始日が同じ場合で、異なる実施期間のケースを比較する。開始日が10日目である“10days delay”で比較すると、実施期間が5日間の場合、第1次感染は10日目~18日目、第2次感染は24日目~33日目、第3次感染は33日目~45日目であることが分かる。これに対して、実施期間が10日間以上の場合、第2次感染及び第3次感染の発生日における感染拡大は起こっていない。これは、第1次感染の期間である10日目~18日目の間に学校閉鎖が実施されるため、汚染されたスポットに未感染のエージェントが入らず、病原体との接触が少ないためであると考えられる。学校閉鎖の期間が長ければ長いほど、病原体との接触の機会は少なく、第2次感染の発生は遅くなる。

また、開始日が13日目である“13days delay”で比較

する。実施期間が5日間の場合、第1次感染は10日目～18日目、第2次感染は20日目～26日である。5日間の学校閉鎖では、第1次感染の期間中に学校閉鎖が終了するために、第1次及び第2次感染における病原体との接触が起こり、感染拡大が発生する。同様に、10日間の学校閉鎖でも、第2次感染の期間中に学校閉鎖が終了するため、この期間中に病原体と接触し、感染拡大が発生する。このことから、学校閉鎖が第1次感染での病原体との接触に間に合わない場合、第2次感染の期間をカバーする学校閉鎖の実施が必要であると考えられる。

学校閉鎖の実施期間が20日間、25日間、30日間では、新規感染者数に大きな違いは見られないことから、感染拡大防止の効果に対し、学校閉鎖を長引かせることによる経済的・教育的な負担によるデメリットは、大きいものになると考えられる。このことから、第1次感染及び第2次感染の期間に合わせた学校閉鎖が、最も効果的な感染拡大防止につながるものと考えられる。

5 むすび

本稿では、致死率の高い感染症が発生した場合の社会対策として、学校閉鎖の開始及び終了時期の設定が感染拡大にいかなる効果を与えるかについて、エージェントベースシミュレーションによる評価を行った。

シミュレーション環境の構築にあたっては、社会シミュレーション言語 SOARS を使用し、病態遷移、感染過程について、致死率の高い感染症の一つである天然痘を例とし、小規模都市における人口構造、住民行動、社会対策をモデル化した。

シミュレーションの結果、天然痘の第1次感染の発生日付近から、第2次感染の期間まで学校閉鎖を実施することにより、患者の新規発生が抑制できることが分かった。これにより、早期の開始かつ継続的な学校閉鎖が患者の発生を遅らせることができ、ワクチン接種のための時間的猶予が得られると考えられる。

本研究では、感染プロセスを人から場への汚染及び場から人への汚染とし、その間にフィルターを介することで汚染の程度が変化するように定式化されている。これにより、社会的対策を表すことができ、従来のシミュレーションモデルの問題点を克服することができた。しかしながら、社会全体の行動をシミュレーションで精密に表現し、正確な被害規模を定量的に推定することは、引き続き難しい。本研究におけるシミュレーションは、住民の属性や行動から、社会のどこに脆弱性があるかを明確にし、その脆弱性を克服するための対策の有効性を定量的に示すことが可能となることから、ワクチン接種や学校閉鎖以外の社会的対策について議論の幅を広げることが、今後の課題である。

参考文献

- 1) H.Nishiura, I.M.Tang : Modeling for a Smallpox-vaccination Policy against Possible Bioterrorism in Japan: The impact of Long-lasting Vaccinal Immunity, *Journal of Epidemiology*, **14(2)** 41/50 (2004).
- 2) D.S.Burke, J.M.Epstein, D.A.T.Cummings, J.I.Parker, K.C.Cline, R.M.Singa, S.Chakravarty: Individual-based Computational Modeling of Smallpox Epidemic Control Strategies, *ACAD EMERGEMED*, **13(11)** 1142/1149 (2006).
- 3) I.M.Longini, M.E.Halloran, A.Nizam, Y.Yang, S.Xu, D.S.Burke, D.A.T.Cummings, J.M.Epstein : Containing a Large Bioterrorist SmallPox Attack: a Computer Simulation Approach, *International Journal of Infection Diseases* **11** 98/108 (2007).
- 4) S.Riley, N.M.Ferguson: Smallpox Transmission and Control: Spatial dynamics in Great Britain, *PNAS*, **103(33)** 12637/12642 (2006), <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0510873103>.
- 5) M.Ishinishi, M.Ichikawa, H.Tanuma, H.Deguchi, Y.Kanatani : The Effects of Vaccination Strategies Against Smallpox Bioterrorism with Agent-Based Simulation, *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems VII*, Springer Japan, 131/145 (2013).
- 6) 田沼秀樹, 出口弘 : エージェントベース社会シミュレーション言語 SOARS の開発, 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.J90-D(9), 2415/2422 (2007).
- 7) J.T.Wu, S.Riley, C.Fraser, G.M.Leung: Reducing the Impact of the Next Influenza Pandemic Using Household-Based Public Health Interventions. *PLoS Medicine*, **3(9)** e361 1532/1540 (2006).
- 8) H.Deguchi, T.Saito, M.Ichikawa, H.Tanuma: SIMULATED TABLETOP EXERCISE FOR RISK MANAGEMENT- ANTI BIO-TERRORISM MULTI SCENARIO SIMULATED TABLETOP EXERCISE -. *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, **38** 1/21 (2011).
- 9) 金谷泰宏, 出口弘, 齋藤知也, 兼田敏之, 小山友介, 市川学, 田沼秀樹: 新型インフルエンザに対するパンデミック対策プログラムとプロジェクト分析, オペレーションズリサーチ, Vol.53, No.12, 667/671 (2008).
- 10) M.I.Meltzer, I.Damon, J.W.LeDuc, J.D.Millar : Modeling Potential Responses to Smallpox as a Bioterrorist Weapon, *Emerging Infectious Diseases*, **7-6** 959/969 (2001).
- 11) J.G.Breman, D.A.Henderson : Diagnosis and Management of Smallpox, *The New England Journal of Medicine*, **17** 1300/1308 (2002).

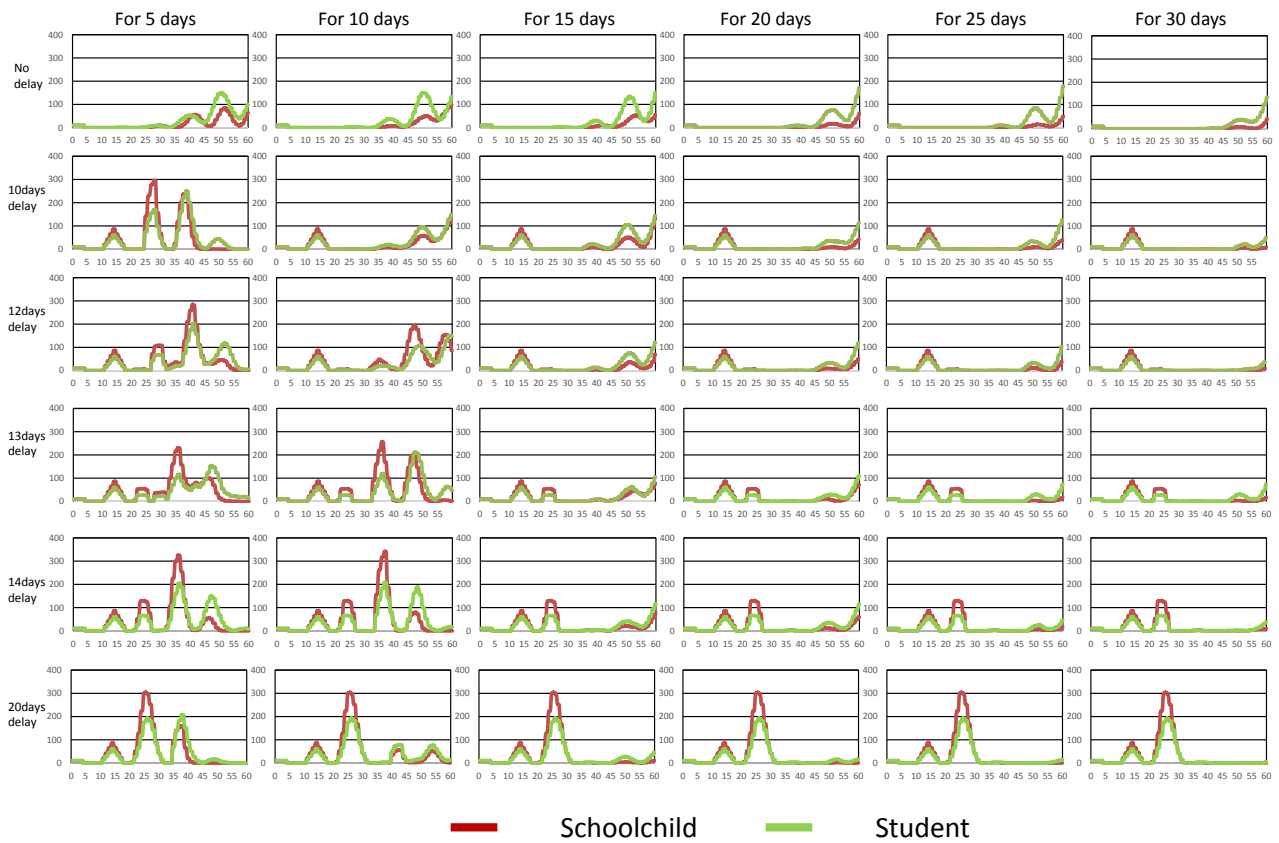


Fig. 4: Relationship between The Period and School Closure Start Date in The Number of Newly Infected People